

Science and Global Security, 2016, Volume 24, No. 2

Supplementary Material

Potential Signatures and the Means of Detecting a Hypothetical Ground Source Cooled Nuclear Reactor
Appendices A, B, C, D and E

Lance K. Kim, Rainer Jungwirth, Guido Renda, Erik Wolfart, and Giacomo G. M. Cojazzi

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ СИГНАТУРЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ГИПОТЕТИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ОХЛАЖДЕНИЕМ ПОДЗЕМНЫМ ИСТОЧНИКОМ

ПРИЛОЖЕНИЯ А, В, С, D и E

**Лэнс К. Ким, Райнер Юнгвирт, Гвидо Ренда,
Эрик Вольфарт и Джакомо Дж. М. Кояцци**

**НАУКА И ВСЕОБЩАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
2016, Том 24, Номер 2, стр. 92–113**

ПРИЛОЖЕНИЕ А:

ОЦЕНКА ДЕПРЕССИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТКАЧИВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ И МОЩНОСТИ ОТКАЧИВАНИЯ

Эти уравнения описывают временную эволюцию конуса депрессии вокруг скважины, откачивающей воду из замкнутого водоносного горизонта. Депрессия s (разность начальной высоты напора H и пьезометрической высоты напора h) на радиальном расстоянии r при скорости откачки V за период времени t из замкнутого водоносного горизонта с гидравлической проводимостью K , толщиной b и коэффициентом упругости пласта S определяется выражением:

$$s(r, t) = H - h(r, t) = (V / (4\pi K b)) W \left[(S r^2) / (4 K b t) \right] \quad (1.1)$$

где функция скважины $W(u)$, или интегральная экспоненциальная функция $E_1(u)$ определяется выражением¹

$$W(u) = E_1(u) = \int_u^{\infty} \exp(-x) / x \, dx \quad (1.2)$$

Упругость замкнутого водоносного горизонта равна произведению удельной упругости S_s на толщину горизонта

$$S = b S_s = b \left[\rho g (\beta_r + \phi \beta_w) \right] \quad (1.3)$$

где удельная упругость определяется плотностью жидкости ρ , ускорением силы тяжести g , пористостью ϕ , сжимаемостью материала горизонта (предполагаемую эквивалентной трещиноватой скальной породе) β_r и сжимаемостью воды β_w . Численные оценки упругости водоносного горизонта приведены в таблице 1.

Таблица 1. Оценка упругости водоносного горизонта.

Свойство	Значение	
Толщина горизонта, b (м)	50	
Плотность жидкости, ρ (кг/м ³)	1000	
Пористость, ϕ	0,14	
Сжимаемость, вода, β_r (1/Па)	4,4·10 ⁻¹⁰	
Сжимаемость, трещиноватая скальная порода, β_w (1/Па)	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁸
Удельная упругость	2·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁴
Упругость пласта	8·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³

На рисунке 1 показана временная эволюция конуса депрессии для скважины с производительностью 8 900 м³/сутки, достаточной для реактора мощностью 30 МВт(тепл.) при откачке из водоносного горизонта с упругостью 5·10⁻³. На рисунке 2 показана зависимость от времени понижения уровня грунтовых вод на радиусе обсадной трубы скважины, на котором показано также влияние уменьшения упругости пласта на два порядка величины. Как видно из этих рисунков, геологическая среда с более высокой проницаемостью и сжимаемостью приводит к меньшим значениям депрессии. Отметим, что эти результаты не будут применимы, если возникнут условия незамкнутой откачки, когда уровень воды упадет ниже верхнего удерживающего слоя горизонта.

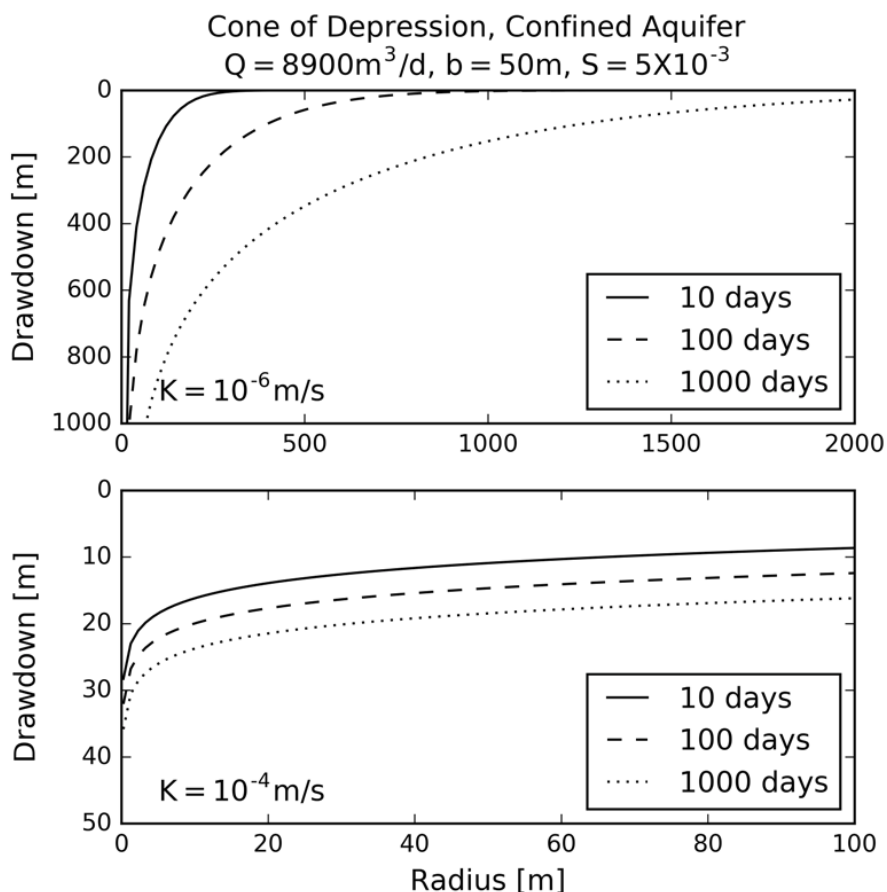


Рисунок 1. Конус депрессии в выбранные моменты времени (10 суток – сплошная линия, 100 суток – штриховая линия и 1 000 суток – пунктирная линия) для скважины с производительностью откачки из замкнутого водоносного горизонта толщиной 50 м в 8 900 м³/сутки при упругоэтомкости пласта в $5 \cdot 10^{-3}$. Верхний рисунок соответствует значению гидравлической проводимости $K = 10^{-6} \text{ м/с}$, нижний рисунок – $K = 10^{-4} \text{ м/с}$. По вертикальной оси отложена депрессия в метрах, а по горизонтальной оси – радиус в метрах.

Большие падения уровня грунтовых вод приводят к повышению требуемой мощности насоса для подъема воды вверх по обсадной трубе. Мощность насосов должна будет обеспечивать достаточный полный динамический напор жидкости при требуемом объеме потока, где полный динамический напор является суммой потерь напора до обсадной трубы скважины (падения уровня грунтовых вод в скважине и дополнительный подъем по вертикали), и потерь на трение в трубопроводах³. Если пренебречь дополнительным подъемом и потерями на трение, механическая мощность насосов, необходимая для преодоления падения уровня грунтовых вод, будет равна:

$$P = \rho V g s \tag{1.4}$$

где ρ – плотность жидкости, V – скорость откачки, g – ускорение силы тяжести и s – депрессия на обсадной трубе скважины. Механическая мощность составляет приблизительно 1 кВт для преодоления депрессии в 1 м при скорости откачки в 8 900 м³/сутки для воды с плотностью 1 000 кг/м³. Для вертикального подъема над статическим уровнем воды потребуется эквивалентное количество мощности накачки, помимо мощности, необходимой для преодоления потерь на трение в трубопроводах.

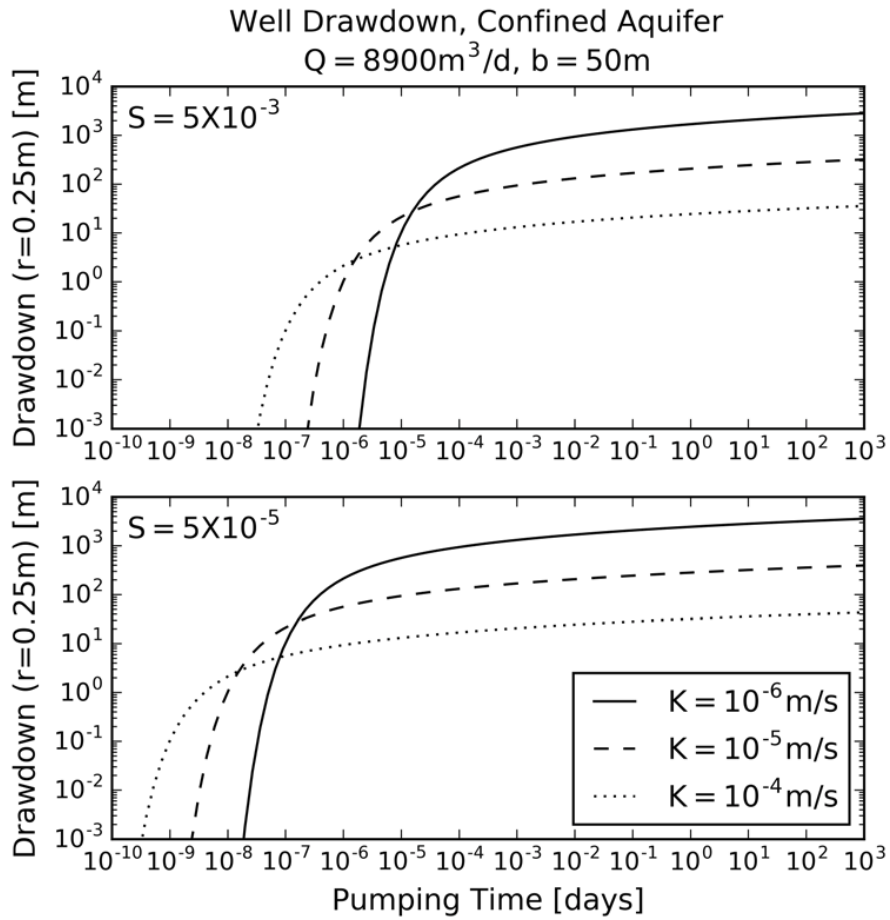


Рисунок 2. Временная эволюция депрессии на обсадной трубе скважины с производительностью откачки из замкнутого водоносного горизонта толщиной 50 м в 8 900 м³/сутки при упругоёмкости пласта в 5·10⁻³ (верхний рисунок) и 5·10⁻⁵ (нижний рисунок). Кривые на рисунках соответствуют различным значениям гидравлической проводимости К (К = 10⁻⁶ м/с – сплошная линия, К = 10⁻⁵ м/с – штриховая линия и К = 10⁻⁴ м/с – пунктирная линия). По вертикальной оси отложена депрессия в метрах на радиусе обсадной трубы 0,25 м, а по горизонтальной оси – длительности откачки в сутках.

ПРИЛОЖЕНИЕ В:

АНАЛОГ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Геотермальные электростанции являются близким аналогом реактора, охлаждаемого подземным источником. По существу, имеются три типа систем извлечения геотермальной энергии: системы с горячей водой (например, Дикси Вэлли в Соединенных Штатах), системы с горячим паром (например, Лардерелло в Италии), и смешанные системы⁴. Эти системы выкачивают геотермальные жидкости через эксплуатационные скважины для питания турбогенератора. На многих геотермальных электростанциях охлажденные геотермальные жидкости снова закачиваются в подземные слои для утилизации сточных вод и для поддержания давления в резервуаре для предотвращения провалов и улучшения возвращения энергии⁵. Эксплуатационный режим этих закачивающих скважин сравним с режимом, который мог бы использоваться в реакторе, охлаждаемом подземным источником. Инжектируемые потоки могут меняться в широких пределах, в зависимости от типа электростанции и характеристик геотермального источника⁶. Например, геотермальная электростанция с мощностью 30 МВт(эл.) может закачивать 150–600 кг/с сточных вод с температурой 100–200 °С⁷.

Ключевое различие состоит в том, что подземные слои служат источником тепла для геотермального производства энергии, а для реактора, охлаждаемого подземным источником, они служат стоком тепла. Если ядерная система выкачивает холодные подземные воды, то геотермальная электростанция использует обычные методы охлаждения для своего конечного стока тепла. Обе системы борются с тепловым прорывом⁸. Прорыв наблюдался на геотермальных площадках и в основном для борьбы с ним использовалось перемещение закачивающих скважин – хотя на геотермальных площадках прорыв может оказать положительное воздействие, понижая депрессию вокруг выкачивающих скважин⁹.

ПРИЛОЖЕНИЕ С:

АВАРИЙНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Если выкачивающая скважина не сможет обеспечить достаточного потока охлаждающей воды, то резервная система охлаждения сможет обеспечить защиту капиталовложений от повреждения активной зоны, предотвратить выброс радионуклидов, которые могли бы быть обнаружены сетью воздухозаборных станций, и защитить здоровье и безопасность населения. Вслед за отключением реактора, вызванным потерей охлаждающего потока, мощность реактора быстро упадет до примерно 6 процентов от своего первоначального значения, и будет экспоненциально уменьшаться со временем. Одной из возможностей может быть теплообменник с воздушным охлаждением и пиковой мощностью охлаждения приблизительно в 2 МВт (6 процентов от 30 МВт), который будет создавать тепловые сигнатуры. Другой возможностью может стать резервуар с водой, выкипающей от тепла, выделяющегося при распаде продуктов деления, передаваемого из активной зоны воздушными циркуляционными насосами или водяными насосами¹⁰. Со временем для восполнения потерь на испарение в выкипающем резервуаре потребуется дополнительная вода, получаемая либо из восстановленного потока из выкачивающей скважины, либо из перенаправления потока из закачивающей скважины, либо получением воды от внешних источников за пределами площадки¹¹.

Размер резервуар с водой, выкипающей от тепла распада, оценивается на основании временной зависимости выделяющейся энергии распада. Если учитывать только теплоту испарения воды ($\Delta h_{\text{исп}} = 2,3$ МДж/кг), то совокупное количество воды, выкипевшей после выключения, $m(t)$, связано с энергией распада (интегралу от тепловой мощности распада, $P(t)$, для реактора, работавшего с тепловой мощностью P_0 в мегаваттах, работавшего в течение периода t_0)¹²:

$$\begin{aligned} m(t) &= (1/\Delta h_{\text{vap}}) \int_{\tau=0}^t P(\tau) d\tau = (1/\Delta h_{\text{vap}}) \int_{\tau=0}^t \left(0.066 P_0 \left(\tau^{-0.2} - (\tau + t_0)^{-0.2} \right) \right) d\tau \\ &= (1/\Delta h_{\text{vap}}) \left(0.0825 P_0 \left(t^{0.8} - (t + t_0)^{0.8} + t_0^{0.8} \right) \right) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Это выражение справедливо для значений t от 10 секунд до 100 суток. Как показано на рисунке 3, построенном с использованием уравнения 1.5, за одну неделю выкипит приблизительно 30 м³ воды, что показывает, что резервуар умеренных размеров удержит достаточно воды для охлаждения реактора, прежде чем понадобится его дополнить.

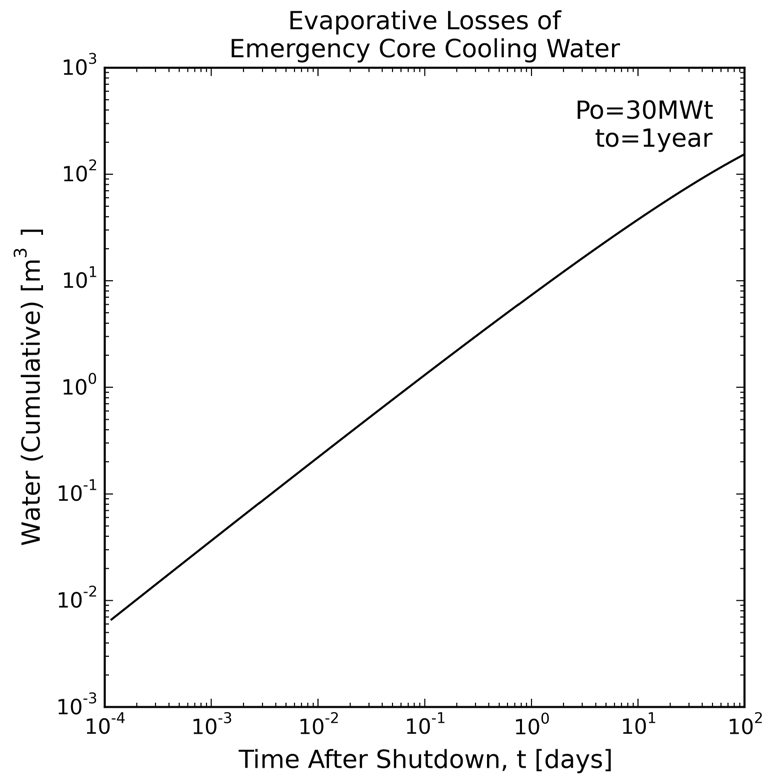


Рисунок 3. Оценка потерь охлаждающей воды на испарение после выключения реактора мощностью 30 МВт после выключения через один год после начала эксплуатации. По горизонтальной оси отложено время после выключения, по вертикальной оси – совокупный объем испарившейся воды.

ПРИЛОЖЕНИЕ D:

ОЦЕНКА ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО ФАКЕЛА

Перенос тепла от подземного теплового факела к земной поверхности может сформировать самую большую область с измененной температурой, доступную для наблюдений на спутниковых тепловых инфракрасных камерах. Область с измененной температурой водоносного горизонта, характеризуемого потоком в пористой среде в отсутствие регионального потока подземных вод оценивается с использованием отношения между закачанным объемом водоносного горизонта, из которого были перемещены подземные воды, V_A , и объема, в котором изменилась температура, V_T . Это отношение зависит от пористости скальной породы, φ , плотности, ρ , и удельной теплопроводности, C , скальной породы (индекс R) и воды (индекс W)¹³:

$$(V_A/V_T) = ((1-\varphi)\rho_R C_R + \varphi\rho_W C_W) / (\varphi\rho_W C_W) \quad (1.6)$$

Объем водоносного горизонта, из которого перемещена вода, определяется объемом воды, V_W , и пористостью матрицы горизонта, φ .

$$V_A = V_W / \varphi \quad (1.7)$$

В предположении, что реактор производит 1 грамм плутония на 1 МВт тепловой энергии, реактор с мощностью 30 МВт(тепл.) произведет существенное количество (8 кг) плутония за 270 суток и сбросит приблизительно $2,4 \cdot 10^6$ м³ охлаждающей воды¹⁴. В предположении пористого потока из закачивающей скважины в известняковый водоносный горизонт толщиной 50 м ($\rho_R = 2500$ кг/м³, $C_R = 0,85$ кДж/кг·К, $\varphi = 0,14$, см. таблицу 2¹⁵), поперечная протяженность зоны перемещенной воды будет эквивалентна цилиндру диаметром 660 м (уравнение 1.7), а диаметр зоны с измененной температурой будет примерно равен 330 м (уравнение 1.6).

Таблица 2. Свойства известняка.

Свойство	Значение
Плотность, ρ_R (кг/м ³)	2410 – 2690
Теплопроводность, k_q (Вт/мК)	2,3 – 3,44
Теплоемкость, C_R (кДж/кг·К)	0,844 – 0,851
Гидравлическая проводимость, K (м/с)	$1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-2}$
Эффективная пористость, φ	0 – 0,36 (средняя: 0,14)

ПРИЛОЖЕНИЕ Е:

ОЦЕНКА ПИКОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для обнаружения захороненного теплового источника со спутниковых тепловых инфракрасных камер усредненная по элементу изображения камеры эффективная температура земной поверхности должна превышать температурный порог¹⁶. Глубина захоронения для минимизации поверхностных тепловых аномалий с малым теплосодержанием зависит от комплексных эффектов энергетического баланса на поверхности, включающих радиационные, ощутимые, скрытые и наземные потоки тепла, накопление энергии в пограничных слоях (например, в растительности и зданиях), и влияние влажности почвы на теплофизические свойства грунта¹⁷.

Температура земной поверхности зависит от комплексного зависящего от времени теплового баланса, следующего за суточными и сезонными вариациями. Суммарная радиационная энергия R_N , падающая на поверхность, распределяется между ощутимыми (H_s), скрытыми (H_L), и наземными (H_G) потоками тепла, и энергией, запасенной в пограничных слоях, приходящейся на единицу площади, $W(t)$:

$$R_N = H_s + H_L + H_G + dW/dt \quad (1.8)$$

Внешнее радиационное воздействие, R_N , состоит из падающего на поверхность суммарного коротковолнового солнечного излучения, суммарного длинноволнового теплового излучения между небом и землей. Эта энергия распределяется между конвективным и кондуктивным теплопереносом от земли к воздуху (ощутимый поток тепла, H_s), потери тепла от земли и растительности в атмосферу из-за испарения влаги (скрытый поток тепла, H_L), теплопроводность через земную поверхность (наземный поток тепла, H_G), и накопление энергии в растительности и зданиях ($W(t)$)¹⁸.

Относительный вклад этих различных механизмов теплопередачи зависит от местоположения, свойств земной поверхности, и в нем наблюдаются суточные и сезонные вариации. Например, солнечное излучение от восходящего солнца нагревает землю, которая затем прогревает окружающий воздух, способствуя конвективному охлаждению поверхности, и испарительному охлаждению грунта. Ночью, в отсутствие охлаждающего бриза и других существенных, нагретая земля в основном охлаждается тепловым излучением в направлении ночного неба (смотрите рисунок 4). В соответствии с этими моделями охлаждения и нагрева, глубинные профили приповерхностной температуры следуют суточным и сезонным циклам, в которых амплитуда температурных «волн», распространяющихся под поверхность, ослабляется с глубиной и отстает от поверхностной температуры по времени¹⁹.

Упрощенная оценка пиковой стационарной температуры поверхности получена из аппроксимации горячей опоры, закачивающей скважины и теплового факела планарным источником тепла с постоянной температурой, захороненным под земной поверхностью. Предполагается, что в холодную безоблачную ночь радиационный теплоперенос в небо является доминирующим механизмом теплопереноса от земной поверхности до пролетающего вверху спутника (смотрите рисунок 5). Это предположение справедливо для сухой поверхности без растительности при прохладной погоде, когда радиационные потери тепла доминируют над ощутимым и скрытым теплопереносом²⁰. Несмотря на сильную идеализацию, данная модель аппроксимирует ночную температуру поверхности прямо над источниками тепла, где температура максимальна.

В одном измерении без внутренней генерации тепла стационарное уравнение тепловой диффузии упрощается до:

$$d^2 N / dz^2 = 0 \quad (1.9)$$

Захороненный трубопровод, закачивающая скважина и тепловой факел аппроксимируются граничным условием с постоянной температурой:

$$T|_{z=0} = T_{hot} \quad (1.10)$$

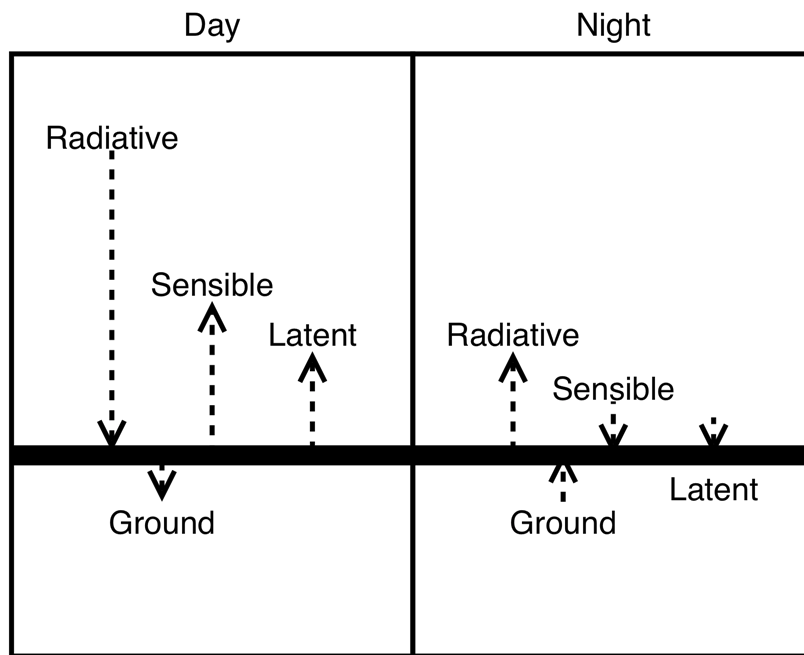


Рисунок 4. Пример дневных (слева) и ночных (справа) потоков тепла. Названия потоков (слева направо) 1 – радиационные; 2 – ощутимые; 3 – скрытые.

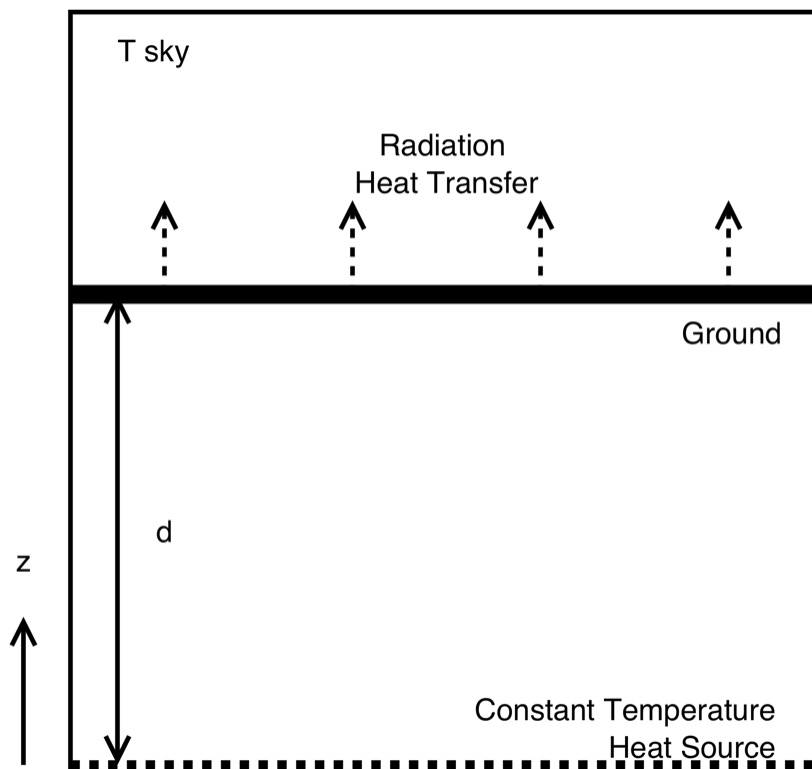


Рисунок 5. Схема модели для оценки температуры земной поверхности, охлаждаемой радиационным теплопереносом в направлении неба и нагреваемой захороненным на глубине d источником тепла с постоянной температурой.

Предполагается, что нагретая земная поверхность охлаждается радиационным теплопереносом в

направлении ночного неба, и что она аппроксимируется небольшим серым телом с излучательной способностью ε , излучающей в небо гораздо большего размера с эффективной температурой T_{sky} :

$$-k_g \left(dT/dz \right) \Big|_{z=d} = \varepsilon \sigma \left(T^4 - T_{sky}^4 \right) \Big|_{z=d} \quad (1.11)$$

где T – температура земли в зависимости от глубины, k_g – теплопроводность земли, d – глубина захоронения и σ – постоянная Стефана-Больцмана.

В отсутствие облачного покрова эффективная температура неба определяется температурой точки росы T_{dp} , зависящей от температуры воздуха, влажности и времени суток:

$$T_{sky} = T_{air} \left[0.711 + 0.0056 T_{dp} + 7.3 \cdot 10^{-5} T_{dp}^2 + 0.013 \cos(2\pi t/24) \right]^{0.25} \quad (1.12)$$

где T_{sky} и T_{air} выражены в градусах Кельвина, T_{dp} – в градусах Цельсия, а время t – в часах после полудня²¹. Это выражение справедливо в интервале $-20^\circ < T_{dp} < +30^\circ$ °C.

Решая уравнение тепловой диффузии (1.9) при указанных граничных условиях (уравнения 1.10 и 1.11), получаем вертикальный профиль температуры земли в зависимости от глубины захоронения d :

$$T(d) = T_{hot} - \left(d \varepsilon \sigma / k_g \right) \left(T(d)^4 - T_{sky}^4 \right) \quad (1.13)$$

Предполагая, что если температура земной поверхности $T(d)$ не будет превышать температуру окружающего воздуха, T_{air} , более, чем на 0,2 °C, то обнаружение будет невозможно (т.е. температуру невозмущенной земной поверхности можно будет принять равной температуре воздуха), то необходимая глубина захоронения может быть итеративно определена из уравнения (1.13). Для известняка необходимая глубина захоронения примерно равна 4 м для значения теплопроводности, излучательной способности, температуры воздуха, и влажности, приведенных в таблице 3. Используя усреднение температуры в формирователе изображения, уменьшение температуры закачивания, или установка изолирующего материала вокруг трубопровода и скважины уменьшает глубину захоронения. Учитывая упрощения и предположения, эти результаты могут рассматриваться только как оценки глубины захоронения только «по порядку величины» – более реалистичные оценки должны учитывать другие механизмы теплопередачи (например, ощутимые, скрытые и наземные потоки тепла), и дневную инсоляцию, которые влияют на эволюцию профиля наземной температуры.

Таблица 3. Оценка глубины захоронения для ограничения пиковой наземной температуры ниже порога обнаружения для построения изображения в диапазоне теплового инфракрасного излучения

Параметр	Значение					
Горячая температура, T_{hot} (°C)	90					
Теплопроводность грунта, k_g (Вт/мК)	3,4					
Порог обнаружения, (°C)	0,2					
Относительная влажность (проценты)	50					
Температура воздуха, T_{air} (°C)	0	10	20			
Температура земной поверхности (°C)	0,2	10,2	20,2			
Температура точки росы, T_{dp} (°C)	-9,2	0,5	9,3			
Эффективная температура неба в полночь, T_{sky} (°C)	-25	-12	3			
Излучательная способность земли, ε	0,83	0,95	0,83	0,95	0,83	0,95
Радиационные потери тепла (Вт/м ²)	85	97	85	97	75	86
Глубина захоронения, d (м)	3,6	3,2	3,2	2,8	3,2	2,8

Исследование, учитывающее сложные особенности баланса энергии на поверхности, показало, что неглубокие подземные воды под свободной от растительности поверхностью может быть обнаружено спутниковыми тепловыми инфракрасными камерами, когда потенциал потерь тепла на испарение высок, и (или) разница между дневными и ночными температурами достаточно высока. Исследование привело к, казалось бы, противоречащим интуиции результатам комплексного взаимодействия почвенной влаги на теплофизические свойства грунта и баланса энергии на поверхности – более глубокие подземные воды повышают

дневные температуры поверхности, понижая ночные температуры поверхности, а менее глубокие подземные воды повышают температуру поверхности зимой, и понижают наземную температуру летом, Эффекты летней наземной температуры становятся более обнаружимыми, чем зимние, и т.п. Однако, ниже критической глубины окружающие подземные воды больше не будут влиять на температуру поверхности, поверхностную влажность почвы, и на баланс энергии на поверхности. При исследованных условиях критическая глубина составляет приблизительно 1 м для достаточно сухой песчаной почвы с высокой гидравлической проводимостью и низкой капиллярностью, и увеличивается до нескольких метров в глинистой почве²². Обычно теплые подземные воды предположительно увеличивают критическую глубину из-за теплопроводности к поверхности, но необходимый анализ, учитывающий специфические условия на площадке, выходит за рамки данной работы.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Ekkehard Holzbecher, *Environmental Modeling: Using MATLAB*, 2nd ed. (Springer Berlin Heidelberg, 2012).
2. Glenn M. Duffield, "Representative Values of Hydraulic Properties," *AQTESOLV*, 2015, http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer_properties.htm.
3. National Exploration, Wells and Pumps, "Submersible Pump Sizing and Selection," n.d., https://www.ihs.gov/EHSCT/documents/sfc_webinar_docs/2013-Pump%20Sizing%20With%20Exercises%20r1.pdf.
4. U.S. Geological Survey, Wendell A. Duffield, and John H. Sass, "Geothermal Energy - Clean Power From the Earth's Heat," 2003, <http://pubs.usgs.gov/circ/2004/c1249/c1249.pdf>; "Visita Alle Centrali," *Enel*, 2009, <http://servizi.enel.it/visitacentrali/it/geotermica/geotermica.asp>.
5. Gudmundur S. Bodvarsson and Valgardur Stefansson, "Some Theoretical and Field Aspects of Reinjection in Geothermal Reservoirs," *Water Resources Research* 25, no. 6 (1989): 1235-48.
6. Eylem Kaya, Sadiq J. Zarrouk, and Michael J. O'Sullivan, "Reinjection in Geothermal Fields: A Review of Worldwide Experience," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, no. 1 (2011): 47-68.
7. G. Bodvarsson, "Thermal Problems in the Siting of Reinjection Wells," *Geothermics* 1, no. 2 (1972): 63-66.
8. Gudmundur S. Bodvarsson and Valgardur Stefansson, "Reinjection into Geothermal Reservoirs," in *Geothermal Reservoir Engineering*, ed. Ender Okandan, vol. 150, NATO ASI Series (Springer Netherlands, 1988).
9. Kaya, Zarrouk, and O'Sullivan, "Reinjection in Geothermal Fields: A Review of Worldwide Experience." (ссылка 6)
10. International Atomic Energy Agency, "General Design and Principles of the Advanced Gas-Cooled Reactor (AGR)," *IAEA International Knowledge Base on Nuclear Graphite*, 2015, [http://nucleus.iaea.org/sites/graphite-knowledgebase/wiki/Guide_to_Graphite/General%20Design%20and%20Principles%20of%20the%20Advanced%20Gas-Cooled%20Reactor%20\(AGR\).aspx](http://nucleus.iaea.org/sites/graphite-knowledgebase/wiki/Guide_to_Graphite/General%20Design%20and%20Principles%20of%20the%20Advanced%20Gas-Cooled%20Reactor%20(AGR).aspx).
11. Kaya, Zarrouk, and O'Sullivan, "Reinjection in Geothermal Fields: A Review of Worldwide Experience." (ссылка 6)
12. Neil E. Todreas and Mujid S. Kazimi, *Nuclear Systems I, Thermal Hydraulic Fundamentals* (Hemisphere Publishing Corporation, 1990).
13. Marcelo J. Lippmann and Chin Fu Tsang, "Ground-Water Use for Cooling: Associated Aquifer Temperature Changes," *Ground Water* 18, no. 5 (October 1980); Walter J. Schaetzle et al., *Thermal Energy Storage in Aquifers: Design and Applications* (Pergamon Press, 1980).
14. "Plutonium Production," *Federation of American Scientists*, June 20, 2000, <http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/plutonium.htm>; International Atomic Energy Agency, "IAEA Safeguards Glossary," International Nuclear Verification Series (Austria, 2002), <http://www-ns.iaea.org/standards/concepts-terms.asp>.
15. Lev Eppelbaum, Izzy Kutasov, and Arkady Pilchin, *Applied Geothermics*, Lecture Notes in Earth System Sciences (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014); C. Yu et al., "Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil" (Argonne National Laboratory, April 1993); National Research Council., *Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation* (Washington, DC: The National Academies Press, 2004).
16. Hui Zhang and Frank von Hippel, "Using Commercial Imaging Satellites to Detect the Operation of Plutonium Production Reactors and Gaseous-Diffusion Plants," *Science & Global Security* 8 (2000): 219-71; Hui Zhang, "Uses of Commercial Satellite Imagery in FMCT Verification," *The Nonproliferation Review*, Summer 2000.
17. Orlando B. Andersland and Branko Ladanyi, *An Introduction to Frozen Ground Engineering* (Springer-Verlag US, 1994); Junsei Kondo and Shigenori Haginoya, "Characteristic Heat Transfer Coefficients Near the Ground at Night During Strong Winds," *Boundary-Layer Meteorology* 46, no. 1-2 (1989): 169-80; P. Groen, "Note on the Theory of Nocturnal Radiational Cooling of the Earth's Surface," *Journal of Meteorology* 4, no. 2 (April 1, 1947): 63-66; Kshudiram Saha, "Heat Balance of the Earth's Surface - Upward and Downward Transfer of Heat," in *The Earth's Atmosphere* (Springer Berlin Heidelberg, 2008), 115-36; S. Pal Arya, *Introduction to Micrometeorology*, Second Edition, vol. 79, International Geophysics Series (Academic Press, 2001); F. Alkhaier, R. J. Schotting, and Z. Su, "A Qualitative Description of Shallow Groundwater Effect on Surface Temperature of Bare Soil," *Hydrology and Earth System Sciences* 13 (September 2009): 1749-56; F. Alkhaier, G. N. Flerchinger, and Z. Su, "The Thermodynamic Effect of Shallow Groundwater on Temperature and Energy Balance at Bare Land Surface, Heat Analysis and Thermodynamic Effects," in *Heat Analysis and Thermodynamic*

- Effects*, ed. Amimul Ahsan (Intech, 2011), <http://www.intechopen.com/books/heat-analysis-and-thermodynamic-effects>; F. Alkhaier, G. N. Flerchinger, and Z. Su, "Shallow Groundwater Effect on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Under Bare Soil Conditions: Modeling and Description," *Hydrology and Earth System Sciences* 16, no. 7 (2012): 1817-31; F. Alkhaier, Z. Su, and G. N. Flerchinger, "Reconnoitering the Effect of Shallow Groundwater on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Using MODIS and SEBS," *Hydrology and Earth System Sciences* 16, no. 7 (2012): 1833-44; F. Alkhaier, "Shallow Groundwater Effect on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance: Description, Modeling and Remote Sensing Application" (Doctoral Dissertation, University of Twente, 2011).
18. Andersland and Ladanyi, *An Introduction to Frozen Ground Engineering* (ссылка 17); Kondo and Haginoya, "Characteristic Heat Transfer Coefficients Near the Ground at Night During Strong Winds" (ссылка 17); Groen, "Note on the Theory of Nocturnal Radiational Cooling of the Earth's Surface" (ссылка 17); Saha, "Heat Balance of the Earth's Surface - Upward and Downward Transfer of Heat" (ссылка 17); Arya, *Introduction to Micrometeorology* (ссылка 17); Alkhaier, Schotting, and Su, "A Qualitative Description of Shallow Groundwater Effect on Surface Temperature of Bare Soil" (ссылка 17); Alkhaier, Flerchinger, and Su, "The Thermodynamic Effect of Shallow Groundwater on Temperature and Energy Balance at Bare Land Surface, Heat Analysis and Thermodynamic Effects" (ссылка 17); Alkhaier, Flerchinger, and Su, "Shallow Groundwater Effect on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Under Bare Soil Conditions: Modeling and Description" (ссылка 17); Alkhaier, Su, and Flerchinger, "Reconnoitering the Effect of Shallow Groundwater on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Using MODIS and SEBS" (ссылка 17); Alkhaier, "Shallow Groundwater Effect on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance: Description, Modeling and Remote Sensing Application." (ссылка 17)
 19. Andersland and Ladanyi, *An Introduction to Frozen Ground Engineering* (ссылка 17); Kondo and Haginoya, "Characteristic Heat Transfer Coefficients Near the Ground at Night During Strong Winds" (ссылка 17); Groen, "Note on the Theory of Nocturnal Radiational Cooling of the Earth's Surface" (ссылка 17); Arya, *Introduction to Micrometeorology* (ссылка 17); Saha, "Heat Balance of the Earth's Surface - Upward and Downward Transfer of Heat." (ссылка 17)
 20. Christian Haselwimmer and Anupma Prakash, "Thermal Infrared Remote Sensing of Geothermal Systems," in *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*, ed. Claudia Kuenzer and Stefan Dech, Remote Sensing and Digital Image Processing (Springer Netherlands, 2013).
 21. John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 4th ed. (Cambridge, MA, USA: Phlogiston Press, 2012).
 22. Alkhaier, Schotting, and Su, "A Qualitative Description of Shallow Groundwater Effect on Surface Temperature of Bare Soil" (ссылка 17); Alkhaier, Flerchinger, and Su, "The Thermodynamic Effect of Shallow Groundwater on Temperature and Energy Balance at Bare Land Surface, Heat Analysis and Thermodynamic Effects" (ссылка 17); Alkhaier, Flerchinger, and Su, "Shallow Groundwater Effect on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Under Bare Soil Conditions: Modeling and Description" (ссылка 17); Alkhaier, Su, and Flerchinger, "Reconnoitering the Effect of Shallow Groundwater on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Using MODIS and SEBS" (ссылка 17); Alkhaier, "Shallow Groundwater Effect on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance: Description, Modeling and Remote Sensing Application." (ссылка 17)